



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

태양에너지 기반 센서 네트워크에서  
데이터 수집량을 최대화하기 위한  
데이터압축 기법

A Data Compress Scheme for Maximizing Sensing Data in So-  
lar-powered Sensor Networks

2015 년 8 월

서울대학교 대학원

전기 · 컴퓨터 공학부

전 준 민

# 태양에너지 기반 센서 네트워크에서 데이터 수집량을 최대화하기 위한 데이터압축 기법

A Data Compress Scheme for Maximizing Sensing Data in  
Solar-powered Sensor Networks

지도교수 신 현 식

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2015 년 6 월

서울대학교 대학원

전기 · 컴퓨터 공학부

전 준 민

전준민의 공학석사 학위论문을 인준함

2015 년 6 월

위 원 장 : \_\_\_\_\_ (인)

부위원장 : \_\_\_\_\_ (인)

위 원 : \_\_\_\_\_ (인)

# 요약

무선 센서 네트워크는 주기적으로 주변 환경 정보를 수집한다. 수집하는 환경 정보를 시간변화에 대해 보다 정밀하게 얻기 위해서는 센싱 주기를 줄여야 하지만 이는 더 많은 에너지를 필요로 한다. 한편 태양에너지 기반 센서 노드는 태양에너지를 통해 수집되는 여분의 에너지를 센서 네트워크의 서비스 품질을 향상시키는데 이용할 수 있으며, 데이터의 압축 기법을 이용하면 데이터의 크기를 줄여 전송에 이용하는 에너지를 줄일 수 있게 된다.

본 논문에서는 태양에너지로부터 수집된 여분의 에너지와 데이터의 압축 기법을 이용해 절약되는 에너지를 이용하여 데이터의 수집량을 늘려 시간변화에 대해 보다 정밀한 데이터를 얻는 기법을 제안한다. 이 기법은 압축률과 압축 소모에너지가 서로 다른 두 가지 압축 알고리즘을 센서 노드의 남은 에너지, 태양에너지로부터 수집되는 에너지, 센서 노드가 사용하는 에너지를 고려하여 적응적으로 선택한다. 이 기법을 이용해 여분의 에너지를 높은 압축률에서 짧은 센싱주기로 수집하는데 이용하여 센싱 데이터의 양을 늘리도록 한다.

본 연구에서 이용한 기법을 이용하면 낮은 압축률의 압축 알고리즘만을 이용하여 데이터를 수집하는 경우에 비해 약 7.8%정도의 데이터를 더 수집할 수 있었으며, 이는 7.8% 더 정밀한 데이터를 수집하였음을 의미한다.

**주요어 :** 태양에너지, 무선 센서 네트워크, 데이터 수집, 데이터 압축

**학 번 :** 2013-20872

# 목차

요약	i
목차	ii
그림 목차	iv
표 목차	iv
제 1 장 서론.....	1
1.1 연구의 동기 .....	1
1.2 연구의 목적 및 개요.....	2
1.3 논문의 구성 .....	4
제 2 장 배경 지식 및 관련연구.....	5
2.1 무선 센서 네트워크.....	5
2.2 무선 센서노드와 싱크노드의 특징.....	6
2.3 센서노드에서의 데이터 압축 기법.....	7
2.4 태양에너지 기반 무선 센서 네트워크 .....	8
제 3 장 적응적 압축 기법.....	11
3.1 적응적 압축 기법 개요.....	11
3.2 압축 알고리즘 .....	12
3.3 노드의 동작 .....	15
3.4 동작모드의 결정.....	16

3.5 문턱값의 결정 .....	1 8
3.6 데이터 수집 주기의 결정 .....	2 0
<b>제 4 장 실험 환경 및 결과 .....</b>	<b>2 2</b>
4.1 실험 환경 .....	2 2
4.2 실험 결과 .....	2 5
<b>제 5 장 결론 및 향후 연구 .....</b>	<b>3 0</b>
<b>참고문헌 .....</b>	<b>3 1</b>
<b>감사의 글 .....</b>	<b>3 8</b>

## 그림 목차

그림 1	센서 네트워크의 일반적인 구성 .....	5
그림 2	배터리 기반 센서 노드 .....	6
그림 3	태양에너지 기반 센서 노드 .....	9
그림 4	S-LZW알고리즘의 동작 .....	1 3
그림 5	노드의 동작 유한상태기계 .....	1 5
그림 6	모드변경 유한상태기계 .....	1 7
그림 7	태양에너지 수집 패턴 .....	2 2
그림 8	노드2의 에너지 잔량 변화 .....	2 5
그림 9	노드0의 에너지 잔량 변화 .....	2 7

## 표 목차

표 1	압축 알고리즘의 비교 .....	1 4
표 2	센서시스템 모사 성능 표 .....	2 3
표 3	노드2의 데이터 수집량 .....	2 6
표 4	노드0의 데이터 수집량 .....	2 7
표 5	네트워크 전체의 데이터 수집량 .....	2 8

# 제 1 장 서론

## 1.1 연구의 동기

무선 센서 네트워크는 특정 지역의 환경 정보를 수집하기 위한 센서들의 네트워크이다. 이런 센서들은 무선으로 설치되기 때문에, 전통적으로 배터리를 이용하여 구동하였다. 이러한 전통적인 배터리 기반 센서 네트워크에서는 노드의 구동 시간을 늘리기 위해 에너지의 소모를 줄이는 것이 주요 연구 주제였다. 배터리 기반 센서 네트워크에서 에너지의 소모를 줄이기 위한 연구로써 데이터를 압축하여 전송에 이용되는 에너지를 줄이는 기법들이 연구되었다[1-4].

한편 최근 들어서는 배터리 기반 센서 네트워크의 단점을 보완하기 위해 주변 환경으로부터 에너지를 수집하는 기술을 센서 노드에 적용하는 연구가 진행되고 있다[5]. 연구된 여러 에너지원 중에서 태양에너지는 높은 전력 밀도와 주기적인 충전 사이클과 같이 센서 네트워크 시스템에 적용하기에 용이한 특징을 가지고 있어 관련 연구가 활발하게 진행되고 있다[6-19].

이렇게 태양에너지로부터 에너지를 수집하는 센서 네트워크를 태양에너지 기반 센서 네트워크라고 한다. 태양에너지 기반 센서 네트워크는 기존 배터리 기반 센서 네트워크와는 다른 에너지 사용 특성을 가지게 된다. 배터리 기반 센서 네트워크에서는 에너지의 소모를 최대한 줄이도록 하는 사용 특성을 가진데 비해, 태양에너지 기반 센서 네트워크는 무조건 에너지의 소모를 줄이기보다는 다른 품질을



높이기 위해 수집되는 에너지 중 여분의 에너지를 이용할 수 있는 특성을 가진다. 하지만 태양에너지 기반 센서 네트워크 역시 에너지를 배터리에 저장하여 이용하고, 수집되는 에너지의 양 역시 한정적이므로 노드가 정전상태가 되지 않도록 주의하여 에너지를 이용해야 할 필요가 있다.

센서 노드는 일정 주기로 센서 데이터를 수집하며, 수집 작업에는 데이터를 수집하기 위해 센서를 구동하기 위한 에너지와 수집된 데이터를 전송하기 위한 에너지가 소모된다. 센싱 주기를 줄일수록 시간 변화에 대해 더 정밀한 데이터를 얻을 수 있으나, 이는 에너지를 더 많이 소모하게 한다. 태양에너지 기반 센서 네트워크에서는 여분의 에너지를 시간 변화에 대해 더 정밀한 데이터를 얻도록 이용할 수 있다.

## 1.2 연구의 목적 및 개요

본 논문에서는 더 정밀한 센서 데이터를 얻기 위해 기존 배터리 기반 센서 네트워크에서 소모 에너지를 줄이기 위해 연구되었던 압축 기법을 태양에너지 기반 센서 네트워크에 적용한다. 압축을 하게 되면 전송되는 데이터의 크기를 일정하게 만들어 다른 노드에 주는 영향을 최소화할 수 있으며 절약되는 전송 에너지를 센서 데이터 수집에 사용할 수 있게 된다.

본 논문에서는 압축률이 다른 두 가지 압축 알고리즘 S-LZW와 S-LZW-BWT를 이용하였다. S-LZW는 압축률이 낮고 압축에 사

용되는 에너지가 적은 알고리즘이다. 이 알고리즘은 압축하는데 드는 에너지보다 압축으로 인해 줄어드는 전송 에너지가 더 크기 때문에 노드가 S-LZW를 수행하며 작동하면 압축을 수행하지 않을 때보다 더 적게 에너지를 소모하여 정전시간이 줄어들게 된다. S-LZW-BWT는 압축률이 높고 압축에 소모되는 에너지가 많은 알고리즘이다. S-LZW-BWT는 S-LZW에 비해 압축에 소모되는 계산 에너지가 매우 커서 압축을 통해 줄어드는 전송 에너지보다 압축에 소모되는 에너지가 더 큰 알고리즘이다. 따라서 노드가 S-LZW-BWT로만 동작한다면 에너지 소모량이 많아 노드의 정전시간이 늘어나게 되므로 단독으로 사용하기에는 부적절한 알고리즘이다.

본 논문에서 제안하는 기법은 노드의 정전시간을 늘리지 않으면서 데이터의 수집량을 늘리기 위해 노드의 에너지 상태에 따라 두 알고리즘을 적응적으로 선택한다.

이 기법은 개별 노드에서 독립적으로 수행되며, 이 기법을 이용하는 노드는 노드의 남은 에너지와 에너지 소모율, 태양에너지 수집률을 고려하여 알고리즘L을 이용하는 L모드와 알고리즘H를 이용하는 H모드를 적응적으로 선택한다. L모드에서는 적은 에너지를 사용하며 에너지를 충전하여 노드의 생존 시간을 늘리고, H모드에서는 에너지를 더 소모하더라도 압축 알고리즘간의 압축률의 차이로 줄어드는 데이터 용량만큼 더 데이터를 수집한다.

요약하면 센서 노드는 L모드와 H모드를 오가며 데이터를 수집하게 되며, L모드 혹은 H모드 한 가지 모드로만 동작할 때보다 더 많은 데이터를 수집하도록 한다.

## 1.3 논문의 구성

본 논문의 나머지 부분은 다음과 같이 구성된다.

2 장에서는 관련 연구들에 대해 살펴본다. 센서 네트워크에 관한 연구와 센서 네트워크에서의 압축에 대한 연구, 그리고 태양에너지 기반 센서 네트워크에 관련된 연구를 소개한다.

3 장에서는 본 논문에서 제안하는 태양에너지 기반 센서 네트워크를 위한 적응적 압축 기법에 대해 살펴본다. 각 모드에서 압축에 이용하는 알고리즘과, 노드의 동작, 노드가 동작할 모드를 결정하는 방법, 데이터 수집 주기를 결정하는 방법에 관하여 설명한다.

4 장에서는 실험을 위한 시뮬레이션 환경에 대한 설명과, 실험 결과에 관하여 설명한다.

5 장에서는 결론 및 향후 연구에 관해 설명하고 마무리한다.

## 제 2 장 배경 지식 및 관련연구

### 2.1 무선 센서 네트워크

무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Network)는 특정 위치에 설치되는 싱크노드와 넓은 지역에 분포되어 설치되는 많은 수의 센서노드로 구성된다. 무선 센서 네트워크는 센서 노드를 통해 환경정보를 수집하고 이를 Ad-hoc 방식의 무선 네트워크를 통해 싱크노드로 보내는 작업을 한다.

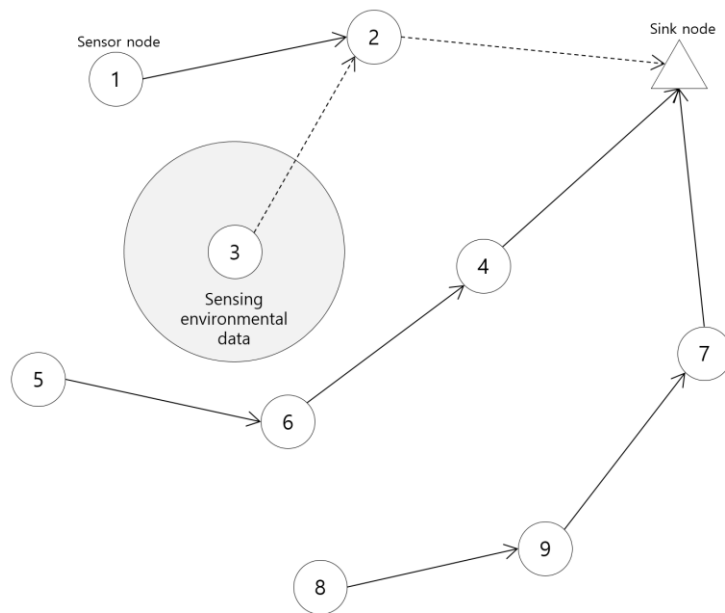


그림 1 센서 네트워크의 일반적인 구성

그림 1 은 무선 센서 네트워크의 대표적인 구성을 나타낸다. 무선 센서노드에서 환경정보를 수집하고 센서노드 간의 통신을 통해 수집된 정보를 싱크노드로 보내게 된다.

## 2.2 무선 센서노드와 싱크노드의 특징

무선 센서 네트워크는 센서노드와 싱크노드로 구성된다. 효율적인 무선 센서 네트워크를 구성하기 위해서는 센서노드와 싱크노드의 특징에 대해 고려해야 한다.

센서노드는 넓은 지역에 많은 수가 분포되어야 하며, 무선으로 동작해야 한다. 또한 무선 센서 네트워크의 존재가 다른 작업에 방해를 주지 않아야 한다. 이러한 조건은 센서노드의 성능을 제한하게 된다. 이에 비하여 싱크노드는 주로 유선으로 연결되기 때문에, 크기나 에너지에 제한을 받지 않아 센서노드에 비해 높은 성능을 가진다.

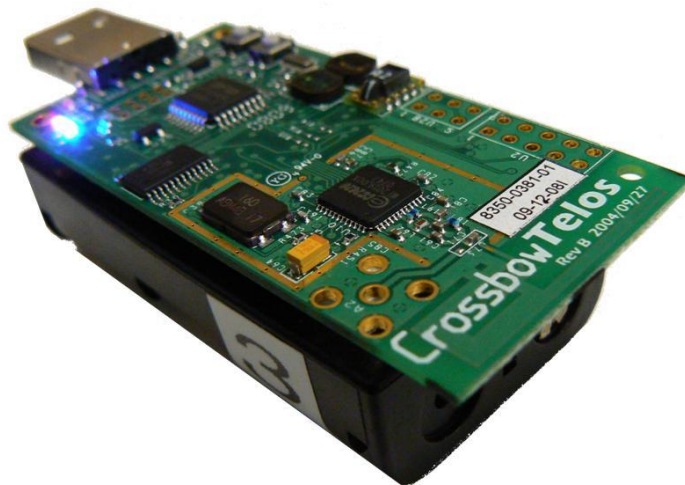


그림 2 배터리 기반 센서 노드

그림 2 는 일반적인 센서노드의 한 종류인 TelosB[20]의 사진이다. TelosB는 250Kbps의 데이터 전송률, 8MHz의 CPU연산속도, 10KB의 RAM과 512KB의 플래시 메모리를 가지고 있다.

센서노드는 넓은 지역에 다량의 센서를 설치하기 때문에 배터리를 교체하는 등의 유지 보수가 어렵다. 따라서 센서노드의 에너지 소비 패턴을 파악하여 에너지를 효율적으로 사용하는 것이 중요하다. TelosB의 데이터시트[20]를 이용하여 센서노드의 일반적인 에너지 소비 패턴을 분석해 보면 센서노드는 송신과 수신에 소비되는 에너지의 양이 비슷하고, 이런 송수신이 연산처리에 비하여 같은 시간에 수십 배 이상의 에너지를 소비하는 특징을 보인다. 이런 특징으로 인해 데이터의 압축을 통해 데이터의 크기를 줄이는 것이 전체적인 에너지 소모를 줄이는 데 도움을 주게 한다.

## 2.3 센서노드에서의 데이터 압축 기법

센서노드의 경우 내장형 시스템으로 구현되며 계산 자원이 매우 한정적이다. 느린 처리장치와 적은 메모리 용량, 한정된 에너지를 이용해서 계산해야 하므로 이에 맞는 경량 압축 기법이 필요하다. 기존 연구에서 이런 저사양 및 저전력 특성에 맞는 압축 알고리즘들이 연구되었다.

Tang 등[1]은 에너지 절감을 위해 센서 노드가 수집한 위치-시간적으로 관련이 있는 데이터에 대한 전력인지 코딩 기법을 제안했다. 이 제안으로 60%이상의 에너지 절감을 가져왔다. Sadler 등[2]

은 기존 LZW알고리즘을 센서 노드와 같이 메모리가 적은 상황에서도 동작하도록 하는 S-LZW 라는 경량 압축 기법을 제시했다. 또한 동일 논문에서 S-LZW에 대응되는 간단한 RLE-ST 압축기법 역시 제안했다. RLE-ST 압축 기법은 S-LZW에 비해 적은 계산 복잡도를 가지며, 더 적은 압축률을 보인다. Marcelloni등[3]은 기초 JPEG 알고리즘을 이용한 엔트로피 기반 압축 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 압축률과 계산 복잡도에서 S-LZW를 능가하는 성능을 보여주었지만, 데이터의 손실이 일어나는 손실 압축 알고리즘이기 때문에 어느 정도 데이터의 손실을 감안하는 센서 네트워크에서 제한적으로 이용될 수 있었다.

Lee 등[4]은 개별 노드 수준이 아닌 네트워크 수준에서 압축 알고리즘을 적응적으로 선택하여 네트워크의 전력 소모를 줄이는 기법에 대해 제안했다. Lee 등은 이 논문에서 새로운 압축 알고리즘을 제시하는 것이 아니라 Sadler 등[2]이 제안한 S-LZW와 RLE-ST의 압축 기법을 이용하며 네트워크 수준에서 해당 알고리즘을 사용하여 전체 네트워크에서 전송에 이용되는 에너지를 줄이는 결과를 보였다.

## 2.4 태양에너지 기반 무선 센서 네트워크

여러 수집 가능한 에너지 자원 중 태양에너지가 가진 좋은 특성으로 인해 많은 태양에너지 기반 센서 시스템이 프로토타입으로 설계되고 연구되었다[6-10, 15, 16]. 그림 3 은 이러한 시제품 중 하나

인 HelioMote[6]의 사진이다. 이런 프로토타입에 대한 연구는 하드웨어 구조나 전원 제어와 같은 노드 수준의 연구에 초점을 두고 있었으며, 네트워크 수준의 성능 최적화 문제에 대해서는 다루지 않았다.



그림 3 태양에너지 기반 센서 노드

이후 진행된 연구에서는 네트워크 수준 최적화 문제를 다루기 시작했다[11-14, 17-19].

Noh 등[17]은 태양에너지 기반 센서 네트워크에서 데이터의 지연시간을 네트워크의 서비스 품질로 두고 수집된 태양에너지의 양, 이웃 노드의 듀티 사이클, 노드의 지리적 위치를 고려한 최저 지연 시간 데이터 전달 기법을 제안하였다. SolarStore[13]는 태양에너지 기반 센서 네트워크에서 배터리의 상태와 저장장치의 상태를 고려하



여 데이터의 안정성을 동적으로 변환시키는 기법으로 제안되었다. AdaptSens[14]는 배터리의 상태에 따라 안정성을 조절하는 계층적 파일 서비스를 제공한다. SolarSS[18]는 배터리의 상태에 따라 데이터의 안정성을 향상시키기 위해 적응적으로 계층을 활성화하여 저장중심(storage-centric) 센서 네트워크에서 데이터의 안정성을 최대화하는 기법으로 제안되었다. 그 외에도 태양에너지 기반 센서 네트워크에서 데이터의 분배를 통해 데이터의 저장량을 최대화하는 기법에 대한 연구[19]에서 수집된 에너지를 데이터 분배에 이용해 센서 네트워크의 데이터의 저장량을 최대화하도록 하는 기법이 제안되었다.

## 제 3 장 적응적 압축 기법

### 3.1 적응적 압축 기법 개요

본 논문에서는 태양에너지 기반 센서 네트워크에서 데이터의 수집량을 늘리기 위한 적응적 압축 기법을 제안한다. 이 기법은 노드의 생존시간을 가능한 한 희생하지 않고 데이터를 더 많이 수집하도록 고안되었다.

이 기법은 두 가지 모드를 가진다. 첫 번째 모드는 에너지 소모를 줄여 노드의 생존 시간을 최대한 늘리기 위해 압축률과 에너지 소모량이 낮은 알고리즘으로 압축을 수행하는 L모드이다. 두 번째 모드는 에너지를 더 소모하여 데이터 수집량을 늘리기 위해 압축률과 에너지 소모량이 높은 알고리즘으로 압축을 수행하는 H모드이다. 노드는 자신의 에너지 수준에 따라 두 모드 가운데 한 가지를 적응적으로 선택하여 동작한다.

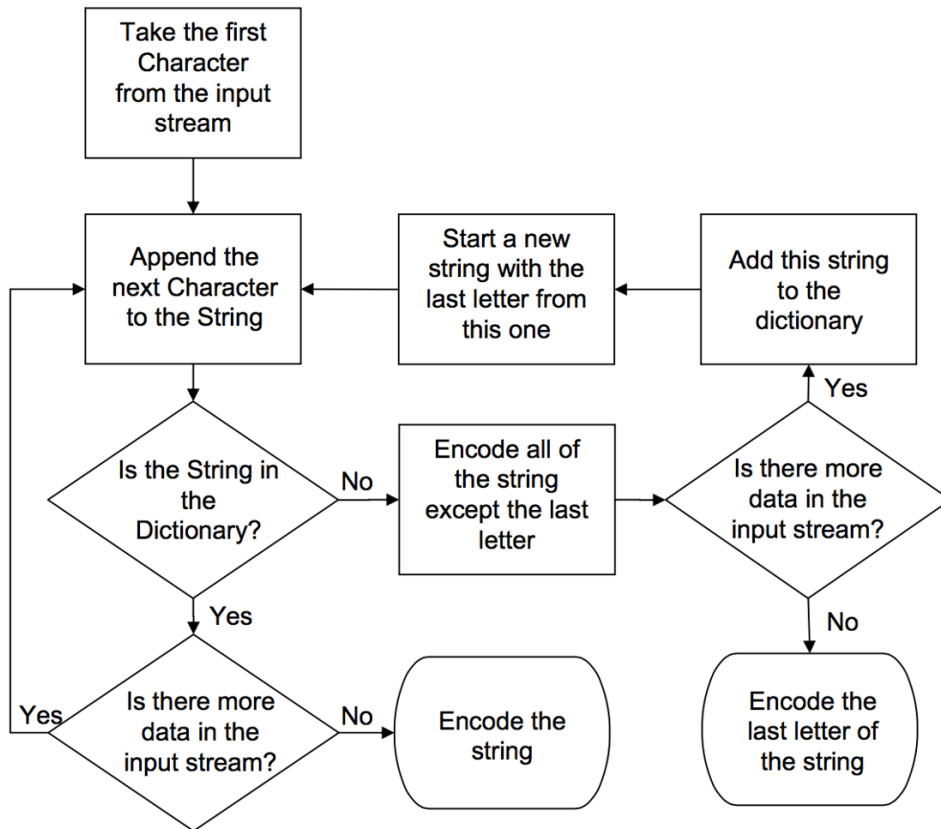
센서 노드의 모드에 따라 압축률이 달라지므로 같은 크기의 데이터를 수집한다면 모드에 따라 압축 데이터의 크기가 달라진다. 센서 네트워크는 Ad-hoc 방식으로 동작하므로, 이렇게 데이터의 크기가 바뀌게 되면 자기 자신의 에너지 소모뿐 아니라 싱크노드까지의 경로에 위치하는 릴레이 노드의 에너지 소모에도 영향을 미치게 된다. 특히 데이터의 크기가 커지게 된다면 예상하지 못한 에너지의 소모로 릴레이 노드가 정전상태에 빠질 수 있다. 이 기법에서는 이러한 영향을 최소화하기 위해 모드에 관계없이 전송하는 데이터의 크기와

전송주기를 일정하게 하였다. H모드에서는 L모드때보다 더 많은 양의 데이터를 수집하여 압축된 데이터 크기를 L모드에서 압축된 데이터 크기에 맞추어 다른 노드의 동작에 영향을 주지 않도록 하였다. 이렇게 주변 노드에 영향을 주지 않는 특성으로 인해 이 기법은 노드의 수와 관계없이 무선 센서 네트워크에 적용 및 확장이 가능하다.

### 3.2 압축 알고리즘

본 논문에서 제안하는 적응적 압축기법은 Sadler 등[2]이 제안한 S-LZW(Sensor LZW) 알고리즘과 그 변형인 S-LZW-BWT(Sensor LZW with Burrows Wheeler Transform) 알고리즘을 이용해 압축을 수행한다.

S-LZW 는 비손실 압축 알고리즘인 LZW알고리즘(Lempel-Ziv-Welch Algorithm)을 센서노드에서 작동할 수 있도록 경량화한 알고리즘이다. 이 알고리즘의 수행 순서는 그림 4 와 같다.



Input Stream: AAAABAAABCC

Encoded String	Output Stream	New Dictionary Entry
A	65	256 - AA
AA	65 256	257 - AAA
A	65 256 65	258 - AB
B	65 256 65 66	259 - BA
AAA	65 256 65 66 257	260 - AAAB
B	65 256 65 66 257 66	261 - BC
C	65 256 65 66 257 66 67	262 - CC
C	65 256 65 66 257 66 67 67	

그림 4 S-LZW알고리즘의 동작

S-LZW-BWT 알고리즘은 데이터에 BWT(Burrows-Wheeler Transform)라는 가역변환을 수행한 뒤 S-LZW를 수행하는 방식이다. BWT는 그 자체로 데이터를 압축하는 효과를 가지고 있는 것은 아니며 데이터를 사전식 압축에 적합하도록 연속된 문자열의 형태로 만들어주어 압축 알고리즘의 압축률을 높이는 데 도움을 준다. 하지만 수행하는 데에 많은 에너지를 소모한다.

S-LZW는 2.5 정도의 압축률을 가지며, S-LZW-BWT는 2.9 정도의 압축률을 가지고, S-LZW-BWT는 S-LZW에 비해 9 배 정도의 에너지를 소모한다.

이를 표로 정리하면 표 1 과 같다.

표 1 압축 알고리즘의 비교

	S-LZW	S-LZW-BWT
압축률	2.5	2.9
압축소모 에너지	5.8mW at 3V	52.8mW at 3V

본 논문에서 제안하는 적응적 압축 기법에서는 L모드에 S-LZW 알고리즘을, H모드에 S-LZW-BWT 알고리즘을 이용하여 압축을 수행한다.

### 3.3 노드의 동작

적응적 압축기법을 이용하는 센서노드는 평소에 태양에너지를 수집하다가 데이터 수집 주기마다 데이터를 수집한다. 또한 노드는 데이터 전송 주기마다 수집된 데이터를 압축하여 Ad-hoc 방식으로 싱크 노드에게 전송한다. 사전식 압축 알고리즘은 데이터가 어느 정도 크기 이상으로 모여야 압축 효율이 높으므로 데이터를 전송 주기마다 압축한다. 마지막으로 노드는 모드 결정 주기마다 동작 모드를 선택한다.

센서 노드의 동작을 그림 5 와 같은 유한상태기계로 표현할 수 있다.

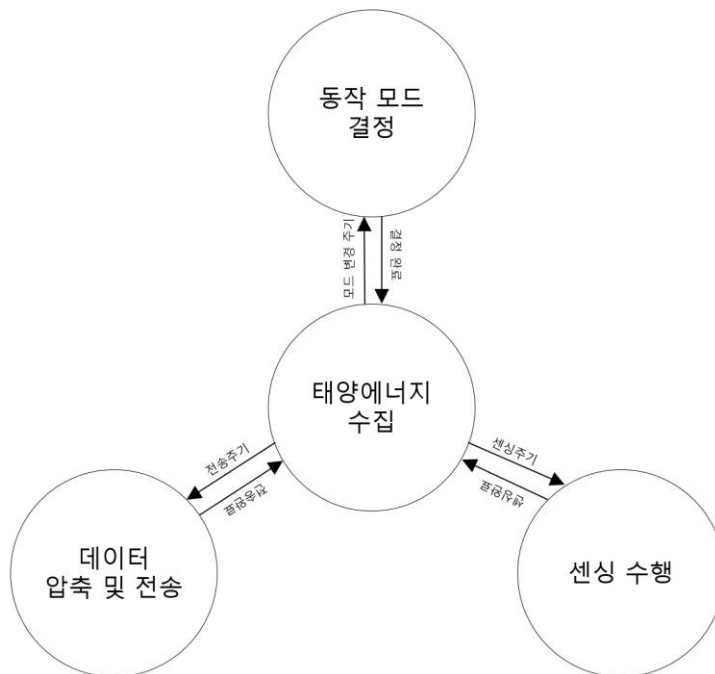


그림 5 노드의 동작 유한상태기계

### 3.4 동작모드의 결정

이 절에서는 앞에서 언급된 동작 모드를 결정하는 방법에 대해 설명한다.

적응적 압축 기법은 노드를 지속적으로 생존하게 하며 가능한 한 많은 데이터를 얻도록 하기 위해 동작 모드를 결정한다.

일단 동작모드를 정하기 위해 노드가 수집하는 태양에너지  $P_{\text{solar}}$ 와 노드가 사용하는 에너지  $P_{\text{sys}}$ , 노드 변경 주기를  $D$ 를 이용하여 어떤 시각  $t$ 에서 모드 변경을 결정할 때, 노드의 생존여부를 예측하기 위해 배터리 잔량의 예측값  $E_{\text{exp}}$ 를 계산한다.

그 뒤  $E_{\text{exp}}$ 로부터 모드 변경의 문턱값  $E_{\text{threshold}}^H$ 와  $E_{\text{threshold}}^L$ 을 구하고 이를 현재 배터리의 잔량  $E_{\text{residual}}$ 과 비교해서 노드의 동작을 결정한다. 문턱값  $E_{\text{threshold}}^H$ 는 L모드로 계속해서 동작할 경우 배터리의 최대 충전량을 넘어서 수집되는 태양에너지가 버려지기 시작하는 전력량을 의미하며, 문턱값  $E_{\text{threshold}}^L$ 은 H모드로 계속해서 동작할 경우 배터리의 모든 에너지를 소모하여 노드가 블랙아웃 상태에 빠지는 전력량을 의미한다.

자세한 동작의 결정은 다음 4 가지 조건을 따른다.

- 1) L모드로 동작할 때의 시스템 소모 에너지  $P_{\text{sys}}^L$ 가 태양에너지 수집량  $P_{\text{solar}}$ 보다 큰 경우에는 ( $P_{\text{sys}}^L > P_{\text{solar}}$ ) 현재 동작중인 모드에 관계없이 시스템을 최대한 오래 동작시키기 위해 다음 동작을 L모드로 결정한다.

- 2)  $P_{sys}^L$ 가  $P_{solar}$  보다 작고( $P_{sys}^L < P_{solar}$ ) 현재 L모드로 동작 중이라면 배터리의 잔량  $E_{residual}$  이 문턱값  $E_{threshold}^H$  보다 클 때( $E_{residual} > E_{threshold}^H$ ) 다음 동작을 H모드로 결정한다.
- 3)  $P_{sys}^L$ 가  $P_{solar}$  보다 작고( $P_{sys}^L < P_{solar}$ ) 현재 H모드로 동작 중이며  $E_{residual} < E_{threshold}^L$  일 때 다음 동작모드를 L모드로 결정한다.
- 4) 이외의 경우 현재 동작모드를 유지한다.

위의 4 가지 조건에 따른 모드의 변경을 유한상태기계로 표현하면 그림 6 과 같다.

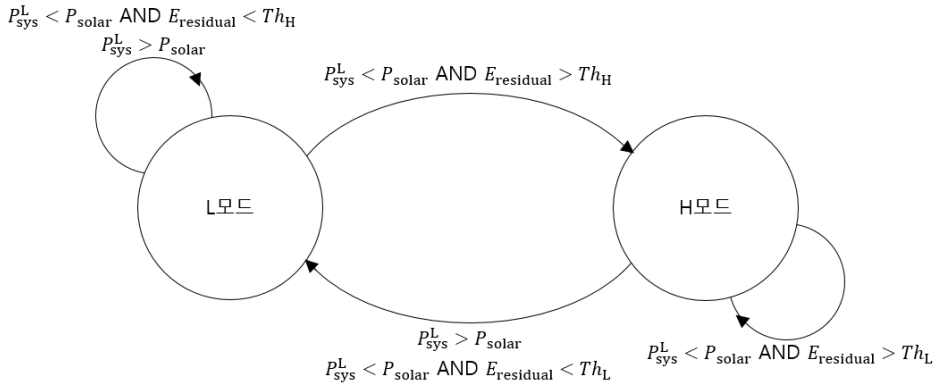


그림 6 모드변경 유한상태기계



### 3.5 문턱값의 결정

3.4 절에서 모드 결정을 위해 문턱값  $E_{\text{threshold}}^H$ 와  $E_{\text{threshold}}^L$ 를 사용하였다. 이번 절에서는 두 값을 어떻게 정하는지에 대해 설명한다.

문턱값을 계산하기 위해 먼저 배터리 잔량의 예측값  $E_{\text{exp}}$ 를 구해야 한다.  $E_{\text{exp}}$ 는 모드 변경 주기가  $D$  일 때, 어떤 시간  $t$ 에서 계산되며,  $t$ 에서 다음 주기 때의 배터리 잔량을 예측한 값이다. 이 예측값은  $t$ 시간의 배터리 상태에서 주기시간  $D$  동안 수집한 태양에너지를 더하고  $D$  동안 소모한 에너지를 빼서 계산하도록 하며, 이를 식으로 표현하면 수식(1)과 같다.

$$E_{\text{exp}}(t, D) = E_{\text{residual}}(t) + \int_t^{t+D} (P_{\text{solar}}(\tau) - P_{\text{sys}}(\tau)) d\tau \quad (1)$$

수식(1)에서  $E_{\text{residual}}(t)$ 는  $t$ 시간에 노드에 남아있는 배터리의 잔량을,  $P_{\text{solar}}(t)$ 는  $t$ 시간의 태양에너지 수집량을,  $P_{\text{sys}}(t)$ 는 노드의 에너지 사용량을 나타낸다.  $P_{\text{solar}}(t)$ 와  $P_{\text{sys}}(t)$ 는 노드의 동작 중에 이 동평균 기법을 이용하여 예측한다.

$P_{\text{sys}}(t)$ 은 L모드와 H모드일 때의 시스템이 소모하는 에너지량이 다르므로  $E_{\text{exp}}(t, D)$ 는 다음 모드가 L모드일 때의 예측값  $E_{\text{exp}}^L(t, D)$ 와 H모드일 때의 예측값  $E_{\text{exp}}^H(t, D)$ 로 나뉘며, 각각 L모드에서의 에너지 소모량  $P_{\text{sys}}^L(\tau)$ 과 H모드에서의 에너지 소모량  $P_{\text{sys}}^H(\tau)$ 를 이용하여 다음과 같이 정의되게 된다.

$$E_{\text{exp}}^{\text{L}}(t, D) = E_{\text{residual}}(t) + \int_t^{t+D} (P_{\text{solar}}(\tau) - P_{\text{sys}}^{\text{L}}(\tau)) d\tau \quad (2)$$

$$E_{\text{exp}}^{\text{H}}(t, D) = E_{\text{residual}}(t) + \int_t^{t+D} (P_{\text{solar}}(\tau) - P_{\text{sys}}^{\text{H}}(\tau)) d\tau \quad (3)$$

우리가 구하고자 하는 문턱값  $E_{\text{threshold}}^{\text{H}}$ 는 노드가 L모드로 계속해서 동작할 경우 배터리의 최대 충전량을 넘어서 수집되는 태양에너지가 버려지기 시작하는 전력량이다. 배터리의 최대 충전용량을  $E_{\text{full}}$ 이라 하면  $E_{\text{exp}}^{\text{L}}(t, D) \geq E_{\text{full}}$ 로 나타낼 수 있다. 이 부등식에 예측값  $E_{\text{exp}}^{\text{L}}(t, D)$ 를 대입하여 수식(4)를 얻을 수 있다.

$$E_{\text{residual}}(t) \geq E_{\text{full}} - \int_t^{t+D} (P_{\text{solar}}(\tau) - P_{\text{sys}}^{\text{L}}(\tau)) d\tau \quad (4)$$

수식(4)는  $t$  시간의 배터리 잔량이  $E_{\text{full}} - \int_t^{t+D} (P_{\text{solar}}(\tau) - P_{\text{sys}}^{\text{L}}(\tau)) d\tau$ 보다 클 경우 수집되는 에너지가 버려진다는 것을 의미한다. 이 식을 만족하는 최소값  $E_{\text{full}} - \int_t^{t+D} (P_{\text{solar}}(\tau) - P_{\text{sys}}^{\text{L}}(\tau)) d\tau$ 이 우리가 구하고자 하는 문턱값  $E_{\text{threshold}}^{\text{H}}$ 이다.

문턱값  $E_{\text{threshold}}^{\text{L}}$ 은 노드가 H모드로 계속해서 동작할 경우 배터리의 모든 에너지를 소모하여 노드가 블랙아웃 상태에 빠지게 되는 전력량이다. 노드가 동작할 수 있는 배터리의 최소 충전용량을  $E_{\text{min}}$

이라 하면  $E_{\text{exp}}^H(t, D) \leq C_{\text{min}}$ 로 표현할 수 있다. 이 부등식을 풀면 수식(5)를 얻을 수 있다.

$$E_{\text{residual}}(t) \leq C_{\text{min}} - \int_t^{t+D} (P_{\text{solar}}(\tau) - P_{\text{sys}}^H(\tau)) d\tau \quad (5)$$

수식(5)에서  $E_{\text{residual}}(t)$ 가 적어도  $C_{\text{min}} - \int_t^{t+D} (P_{\text{solar}}(\tau) - P_{\text{sys}}^H(\tau)) d\tau$ 만큼은 유지를 하고 있어야 노드가 블랙아웃에 빠지지 않는다는 것을 알 수 있으며, 배터리 잔량이 이 값 이하로 떨어질 경우 노드의 생존시간을 늘리기 위해 배터리 소모가 적은 L모드로 동작하도록 한다. 이 값을  $E_{\text{threshold}}^L$ 로 정한다.

### 3.6 데이터 수집 주기의 결정

본 논문에서 제안하는 기법은 모드에 따라 압축률이 바뀌기 때문에 같은 양의 데이터를 수집할 경우 압축된 데이터의 용량이 달라져 전송 데이터의 크기가 달라지게 된다. 이 기법에서는 다른 노드에게 미치는 영향을 최소화하기 위해 모드가 바뀌더라도 전송되는 데이터의 양과 전송 주기를 유지한다. 전송 데이터의 양과 전송 주기를 일정하게 유지하며 데이터의 크기를 늘리려면 데이터의 수집 주기를 조절해야 한다.

데이터 수집 주기를 결정하기 위해 먼저 전송되는 데이터의 크기  $S_{\text{tx}}$ 를 구하도록 한다.

1 회 센싱을 수행 될 때 얻어지는 데이터의 크기를  $S_{\text{data}}$ 라고 하고, 센싱 주기를  $C_{\text{sense}}$  라고 하면 초당  $S_{\text{data}}/C_{\text{sense}}$  만큼의 데이터를 수집한다. 전송 주기가  $D_{\text{tx}}$ 이면 전송 주기동안 얻어지는 원본 데이터의 용량은  $S_{\text{data}}/C_{\text{sense}} * D_{\text{tx}}$  가 되며, 원본 데이터를 압축률  $R_{\text{compress}}$ 로 압축한 전송 데이터의 용량은 수식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{\text{tx}} = \frac{S_{\text{data}} * D_{\text{tx}}}{C_{\text{sense}} * R_{\text{compress}}} \quad (6)$$

수식(6)으로부터 전송 용량과 전송 주기가 고정되어 있을 때 센싱 주기는 수식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{\text{sense}} = \frac{S_{\text{data}} * D_{\text{tx}}}{S_{\text{tx}} * R_{\text{compress}}} \quad (7)$$

수식(7)에 모드에 따른 압축율  $R_{\text{compress}}^{\text{L}}$  과  $R_{\text{compress}}^{\text{H}}$  을 적용하여 모드에 따른 센싱 주기  $C_{\text{sense}}^{\text{L}}$  과  $C_{\text{sense}}^{\text{H}}$  를 결정한다.

## 제 4 장 실험 환경 및 결과

### 4.1 실험 환경

태양에너지 기반 센서노드의 경우 실험 결과를 정확하게 비교하기 위해서는 에너지 수집패턴이 같아야 한다. 하지만 실제 테스트베드를 이용하여 실험 환경을 구현할 경우에 날씨를 동일하게 통제할 수 없어서 에너지 수집패턴을 동일하게 가져올 수 없다. 따라서 본 논문에서는 에너지 수집패턴을 동일하게 적용하기 위해 시뮬레이션을 이용하여 실험을 진행하였다.

실험을 위해 모사한 시스템은 크게 에너지 시스템과 센서시스템으로 나누어진다. 먼저 에너지 시스템은 이전 연구[14]에 이용한 에너지 시스템의 정보를 토대로 모사하였다. 에너지 시스템에서 가장 중요한 태양에너지 수집 패턴은 이전 연구[14]에서 10 월 21 일부터 11 월 4 일까지 15 일간 조사한 태양에너지 수집 패턴을 이용하였다.

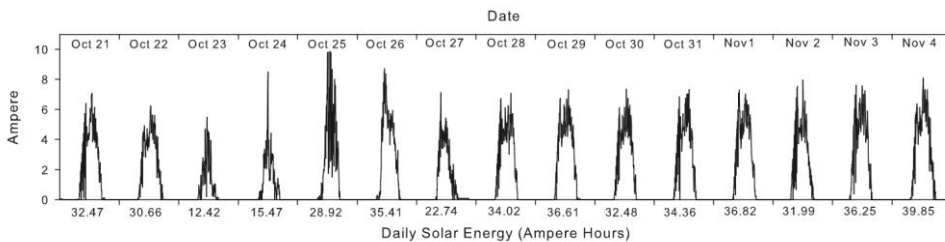


그림 7 태양에너지 수집 패턴

센서시스템은 [2]의 실험 환경을 참조하여 구성하였다. 이 시스템은 TmoteSky [21]나 ZebraNet [22]의 센서노드에서 이용하는 TI MSP430x1611 마이크로 프로세서를 가지며, 무선송수신 장치로는 Chipcon CC2420 을 이용하는 것으로 모사하였다. 센서에서 수집하는 데이터에는 SensorScope [23]의 데이터를 이용하였다.

모사한 센서시스템의 성능을 표 2에 정리하였다.

표 2 센서시스템 모사 성능 표

Chipset	MSP430x1611
Clock	4MHz
RAM	10kB
Flash Memory	48kB
Radio Chipset	Chipcon CC2420
Radio Range	125m
TX Power	46.7 mW at 3V
RX Power	50.9 mW at 3V
Baud Rate	70,677
Battery	10400 mAh

센서 네트워크는 싱크 노드 1 개와 센서 노드 99 개, 총 100 개의 노드를 배치하도록 모사하였으며 (MDT)Multicast Distribution Tree를 이용한 라우팅을 모사하였다.

센서 노드에서 센서는 4 바이트의 실수 5 개를 읽어 한번 센싱 데이터를 수집할 때마다 20 바이트의 데이터를 수집하며, 효율적인 데이터의 압축을 위해 매 10 분 동안의 데이터를 모아 압축을 수행한 뒤 전송한다.

기본 모드인 L모드에서의 데이터 수집 주기는 10 초당 1 회(0.1 회/s, 2 bytes/s)로 결정하였으며, 이 경우 10 분(600 초, 60 회)간 수집하는 원본 데이터의 양은 1,200bytes가 된다.

태양에너지 수집 패턴이 15 일분량이므로 실험은 태양에너지를 수집한 15 일동안 동작하는 것으로 모사하였다.

실험은 노드가 15 일동안 L모드로만 동작할 때와 H모드로만 동작할 때, 그리고 본 논문에서 제안한 적응적 기법을 이용하여 동작할 때 각각의 데이터 수집량과 노드에서의 에너지 잔량 변화를 비교하여 적응적 기법이 각각의 압축 알고리즘만을 이용 하는 경우보다 얼마나 많은 데이터를 수집할 수 있는지 측정하도록 한다.

## 4.2 실험 결과

실험 결과 개별 노드에서 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

개별 노드는 싱크노드와 거리가 가장 가까운 노드와 가장 먼 노드 두 가지를 골라서 측정하도록 하였다. 노드 2 는 싱크노드에서 가장 가까운 노드로 센서 네트워크를 구성하는 노드 중에서 가장 에너지의 소모가 많은 노드이며, 노드 0 은 싱크노드에서 가장 먼 말단 노드로 센서 네트워크를 구성하는 노드 중에서 가장 에너지의 소모가 적은 노드이다.

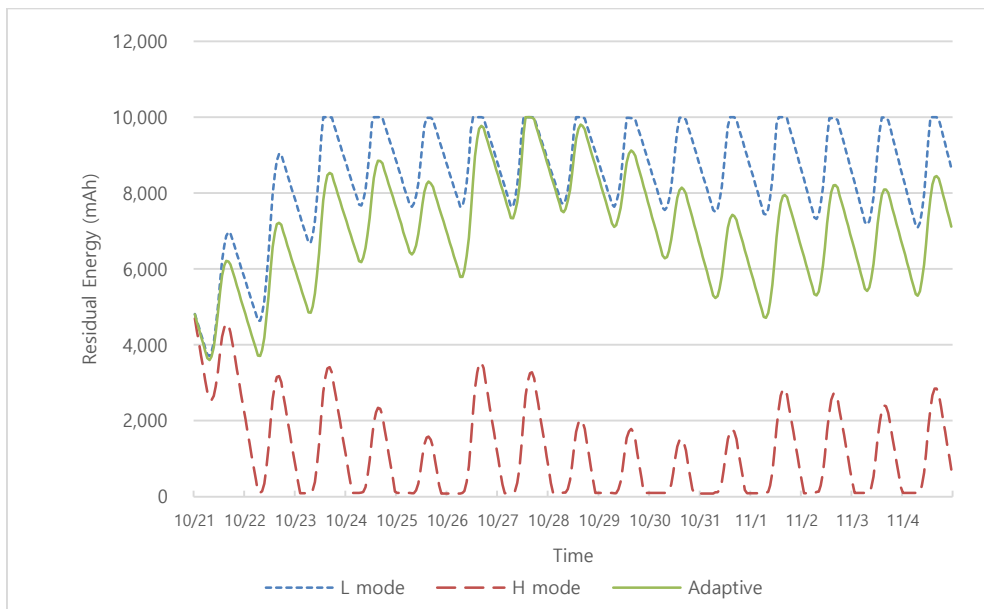


그림 8 노드2의 에너지 잔량 변화

그림 8 은 노드 2 의 에너지 사용량을 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 노드 2 는 H모드로 동작할 경우 너무 많은 에너지 소모로 잦은 정전상태에 빠지게 되며, L모드만으로 동작할 경우엔 에너지가



남아 완전히 충전된 상태가 존재하는 것을 볼 수 있다. Adaptive 모드로 동작할 경우 L모드에 비해 더 많은 에너지를 이용하면서도 H모드와 같이 정전상태에 빠지지 않는다.

**표 3 노드2의 데이터 수집량**

동작모드	L only	H only	Adaptive
데이터 수집량 (Bytes)	2,355,940	2,136,420	2,507,200

표 3는 노드 2가 15 일동안 수집한 데이터 수집량을 나타낸다.

H모드로 동작할 때엔 정전상태에 있는 시간 때문에 오히려 데이터의 수집량이 줄어든다. 본 논문에서 제안한 적응적 기법을 이용하여 L모드에 비해 6%정도의 추가 데이터를 수집할 수 있었다.

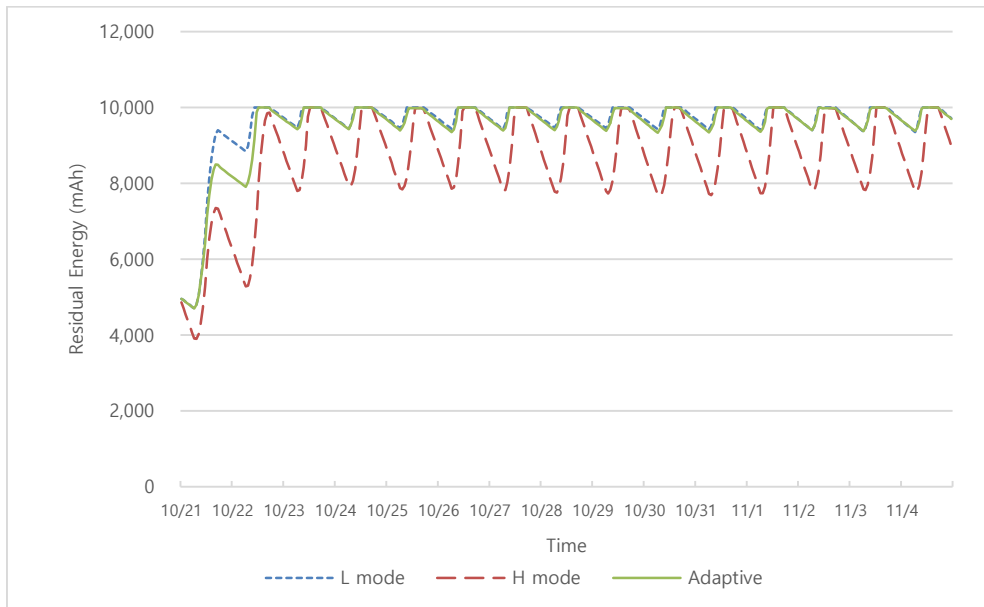


그림 9 노드0의 에너지 잔량 변화

그림 9 는 노드 0 의 에너지 사용량을 나타낸 것이다. 노드의 에너지는 거의 데이터의 전송을 하는데 이용되는데, 말단노드는 자신의 데이터만 전송하기 때문에 에너지의 소모가 적게 일어난다.

표 4 노드0의 데이터 수집량

동작모드	L only	H only	Adaptive
데이터 수집량 (Bytes)	2,355,940	2,879,180	2,577,740

표 4 는 노드 0 에서 15 일동안 수집한 데이터의 크기를 나타낸다. 이 경우에도 적응적 기법은 L모드로 동작할 때에 비해서 9% 더 많은 데이터를 수집한다.

다음으로 개별 노드가 아닌 망 전체에서 얻는 데이터 수집량을 비교하면 표 5 와 같다.

**표 5 네트워크 전체의 데이터 수집량**

동작모드	L only	H only	Adaptive
센서노드의 데이터 수집량 합계 (Bytes)	233,238,060	263,505,680	251,564,040
싱크노드의 데이터 수집량 (Bytes)	233,238,060	222,894,100	251,564,040

마찬가지로 15 일동안 센서네트워크 전체에서 수집한 데이터의 합계이다. 센서노드에서 각각 수집한 데이터 양을 합계한 값과 싱크노드에서 수집된 양을 표현하였다. 센서노드에서 수집한 데이터 양은 실제로 각 센서 노드에서 수집한 데이터의 양이며, 싱크노드에서 수집된 양은 센서 네트워크에서 수집한 데이터의 양이 된다.

표 5 를 분석해 보면 H모드의 경우 전체 센서노드에서 수집한 데이터 중 15%정도의 손실이 발생하였음을 알 수 있다. 싱크노드에 가까운 노드가 정전상태에 빠지게 되면 해당 노드를 통해 데이터를 전송하는 하위 노드들의 데이터 역시 싱크 노드에서 수집할 수 없고 데이터의 손실이 일어난다. 이러한 이유로 정전시간이 존재하는 H모

드의 데이터 수집량이 세 방식 중 가장 낮게 나타났다. L 모드와 적응적 모드의 경우에는 정전시간이 발생하지 않았으며, 적응적 모드의 경우 L 모드에 비해 약 7.8%의 데이터를 더 수집하였다.

## 제 5 장 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 태양에너지 기반 센서 네트워크에서 압축 알고리즘의 적응적 선택으로 데이터의 수집량을 늘려 데이터의 시간변화에 대한 정밀도 품질을 높이는 기법에 대해 소개하였다.

본 연구에서 제안한 적응적 기법을 사용하여 데이터를 수집하면 낮은 압축률의 압축 알고리즘만을 이용하여 데이터를 수집하는 경우에 비해 약 7.8% 정도의 데이터를 더 수집할 수 있었으며, 이는 평균 7.8% 더 정밀한 데이터를 수집하였음을 의미한다.

본 연구에서 제안한 압축기법은 데이터를 일정량 모아 전송하므로 수집한 값이 싱크노드까지 도착하는데 지연을 가질 수 밖에 없다. 만약 이상 현상 측정 데이터와 같이 수집된 값이 실시간으로 중요한 정보를 가지는 경우에는 본 기법을 이용할 수 없다. 수집한 값이 전송되는 지연 요구사항을 만족시키기 위한 추가 연구가 필요하다.

또한 본 기법은 싱크노드가 항상 존재하고는 일반적인 센서 네트워크를 가정해 제안되었기 때문에, 싱크노드가 항상 존재하지 않고 각 센서노드에 수집된 데이터가 분산되어 저장되는 저장중심 센서 네트워크를 위해서도 응용할 수 있도록 추가 연구가 필요하다.

## 참고문헌

- [1] T. Caimu, C. S. Raghavendra, and V. K. Prasanna, "Power aware coding for spatio-temporally correlated wireless sensor data." *2004 IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems*, 2004, pp. 134–143.
- [2] C. M. Sadler and M. Martonosi, "Data compression algorithms for energy-constrained devices in delay tolerant networks." *Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Boulder, Colorado, USA, 2006, pp. 265–278.
- [3] F. Marcelloni and M. Vecchio, "A Simple algorithm for data compression in wireless sensor networks." *IEEE, Communications Letters*, vol. 12, pp. 411–413, 2008.
- [4] H. Lee, H. Kim, and I. J. Chang, "CPAC: Energy-efficient data collection through adaptive selection of compression algorithms for sensor networks." *Sensors*, vol. 14, pp. 6419–6442, 2014.
- [5] 최성진, "에너지 하베스팅 기술과 전력전자." *KIPE MAGAZINE*, vol. 18, pp. 31–36, 2013.
- [6] K. Lin, J. Yu, J. Hsu, S. Zahedi, D. Lee, J. Friedman, *et al.*, "Heliomote: enabling long-lived sensor networks through solar energy harvesting." *Proceedings of the 3rd*

*International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, San Diego, California, USA, 2005, pp. 309–309.

- [7] T. Liu, C. M. Sadler, P. Zhang, and M. Martonosi, "Implementing software on resource-constrained mobile sensors: experiences with Impala and ZebraNet." *Proceedings of the 2nd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, 2004, pp. 256–269.
- [8] V. Raghunathan, A. Kansal, J. Hsu, J. Friedman, and M. Srivastava, "Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems." *Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, Los Angeles, California, 2005, p. 64.
- [9] A. Kansal, J. Hsu, M. Srivastava, and V. Raghunathan, "Harvesting aware power management for sensor networks." *Proceedings of the 43rd Annual Design Automation Conference*, San Francisco, CA, USA, 2006, pp. 651–656.
- [10] C. M. Vigorito, D. Ganesan, and A. G. Barto, "Adaptive Control of Duty Cycling in Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks." *4th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON '07)*, 2007, pp. 21–30.
- [11] T. Voigt, H. Ritter, and J. Schiller, "Utilizing solar power in wireless sensor networks." *Proceedings of the 28th Annual*

*IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN '03)*, 2003, pp. 416–422.

- [12] D. Noh, D. Lee, and H. Shin, "QoS-aware geographic routing for solar-powered wireless sensor networks." *IEICE Transactions on Communications*, vol. 90, pp. 3373–3382, 2007.
- [13] Y. Yang, L. Wang, D. K. Noh, H. K. Le, and T. F. Abdelzaher, "SolarStore: enhancing data reliability in solar-powered storage-centric sensor networks." *Proceedings of the 7th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, 2009, pp. 333–346.
- [14] W. Lili, Y. Yong, N. Dong Kun, H. K. Le, L. Jie, T. F. Abdelzaher, *et al.*, "AdaptSens: An Adaptive data collection and Storage Service for Solar-Powered Sensor Networks." *Real-Time Systems Symposium (RTSS '09)*, 2009, pp. 303–312.
- [15] C. Alippi and C. Galperti, "An Adaptive System for Optimal Solar Energy Harvesting in Wireless Sensor Network Nodes." *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 55, pp. 1742–1750, 2008.
- [16] J. Taneja, J. Jeong, and D. Culler, "Design, modeling, and capacity planning for micro-solar power sensor networks." *Proceedings of the 7th International Conference on*



*Information Processing in Sensor Networks*, 2008, pp. 407–418.

- [17] D. Noh, I. Yoon, and H. Shin, "Low-latency geographic routing for asynchronous energy-harvesting WSNs." *Journal of Networks*, vol. 3, pp. 78–85, 2008.
- [18] D. Noh, "An Adaptive Storage System for Enhancing Data Reliability in Solar-powered Sensor Networks." *Journal of KIISE : Computer Systems and Theory*, vol. 36, pp. 360–370, 10 2009.
- [19] D. Noh, "An Efficient Data Distribution Scheme for Maximizing the Amount of Data Stored in Solar-powered Sensor Networks." *Journal of KIISE : Computer Systems and Theory*, vol. 37, pp. 55–59, 2010.
- [20] Crossbow. *TelosB data sheet*.
- [21] SkyTmote. (2005). *Low power wireless sensor module*.
- [22] P. Zhang, C. M. Sadler, S. A. Lyon, and M. Martonosi, "Hardware design experiences in ZebraNet." *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Baltimore, MD, USA, 2004, pp. 227–238.
- [23] T. Schmid, H. Dubois-Ferriere, and M. Vetterli, "Sensorscope: Experiences with a wireless building monitoring sensor network." *Workshop on Real-World*

*Wireless Sensor Networks*, 2005, pp. 20–24.

## Abstract

# A Data Compress Scheme for Maximizing Sensing Data in Solar-powered Sensor Networks

Jeon Joonmin

Department of Electrical Engineering and Computer  
Science  
Collage of Engineering  
The Graduate School  
Seoul National University

Wireless sensor networks periodically collect environmental information. In order to collect environmental information more precisely, the sensing period must be decreased, but that consumes more energy. However, a solar-powered sensor node can increase QoS of networks by using surplus solar energy, and a data compression scheme can decrease the amount of data and reduce transmission energy.

In this paper, the proposed adaptive compression scheme to get more precise environmental information by using extra energy saved by a data compression scheme and harvested.

In this scheme, each node adaptively selects the compression algorithm which has different compression ratio and energy consumption ratio by considering residual, consumed, and harvested energy. It can gather more sensory data with high

compression ratio and short sensing period by using surplus energy. The proposed scheme can gather 7.8% more precise data than the traditional scheme by collecting extra data

**keywords : wireless sensor networks (WSNs), solar-powered WSNs, data compression**

**student number : 2013-20872**